



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE E VULNERABILIDADE
AOS PROCESSOS EROSIVOS DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO SÃO FRANCISCO NO ESTADO DE SERGIPE**

MARIANNE SILVA SANTOS

SÃO CRISTÓVÃO, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE E
VULNERABILIDADE AOS PROCESSOS EROSIVOS DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO NO
ESTADO DE SERGIPE**

Trabalho final apresentado ao
Departamento de Engenharia Ambiental
da Universidade Federal de Sergipe,
como parte integrante dos requisitos
para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

PAULO SÉRGIO DE REZENDE NASCIMENTO
Orientador

MARIANNE SILVA SANTOS

SÃO CRISTÓVÃO, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE E VULNERABILIDADE AOS
PROCESSOS EROSIVOS DA BÁCIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO
NO ESTADO DE SERGIPE**

Trabalho apresentado e aprovado em 30 de agosto de 2019 pelo Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Sergipe para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

BANCA EXAMINADORA:

Paulo Sérgio de Rezende Nascimento

Prof. Dr. (Departamento de Engenharia Ambiental – UFS)

Jefferson Arlen Freitas

Prof. Dr. (Departamento de Engenharia Ambiental – UFS)

Glauber Vinicius Pinto de Barros

Engenheiro Ambiental e Sanitarista e Mestrando
(Programa de Pós-Graduação em Meteorologia – UFAL)

RESUMO

As intervenções humanas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco no Estado de Sergipe, área de estudo desse trabalho, aceleram os processos erosivos no terreno e o assoreamento no corpo d'água. Diante disso, este trabalho visou delimitar as áreas suscetíveis e vulneráveis aos processos erosivos por meio de técnicas de geoprocessamento. Para tal foram utilizados dados SRTM, mapas temáticos disponibilizados pela CPRM, SEMARH, e o software QGIS. Inicialmente confeccionou-se mapas de declividade, hipsometria, erosividade, erodibilidade, atribuindo pesos às suas respectivas classes temáticas com relação a predominância dos processos de pedogênese e morfogênese. Em seguida, aplicou-se o método do Processo de Análise Hierárquica (AHP) para determinar a importância relativa entre os fatores naturais que controlam os processos erosivos. Através da Álgebra de Mapas obteve-se o mapa de suscetibilidade à erosão integrando os mapas de declividade, hipsometria, erodibilidade e erosividade. O mapa de vulnerabilidade à erosão resultou da integração do produto anterior com o de cobertura do solo. A partir da análise dos resultados identificou-se que a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco apresenta, predominantemente, baixo potencial a suscetibilidade erosiva, cerca de 65% da área total. No que tange a vulnerabilidade da área de estudo, constatou-se a predominância de regiões com baixo potencial erosivo, em função das áreas de pastagens. A metodologia aplicada se mostrou eficiente, robusta e adequada para análise dos processos erosivos. Dessa forma, os produtos gerados são ferramentas técnico-gerenciais de auxílio na tomada decisão necessária à minimização dos impactos socioambientais decorrentes da erosão. Nesse sentido, sugere-se o disciplinamento das águas superficiais e subsuperficiais e a contenção das encostas, medidas consagradas na literatura científica para evitar, minimizar, recuperar gerenciar e monitorar os processos erosivos em áreas urbanas e/ou rurais.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Álgebra de Mapas. Processo de Análise Hierárquica.

ABSTRACT

Human interventions in the São Francisco River Basin in Sergipe State, the area of study of this work, accelerate the erosive processes on the ground and siltation in the body of water. Given this, this work aimed to delimit the susceptible and vulnerable areas to erosive processes through geoprocessing techniques. For this, SRTM data, thematic maps provided by CPRM, SEMARH, and the QGIS software were used. Initially, maps of slope, hypsometry, erosivity, erodibility were made, giving weights to their respective thematic classes in relation to the predominance of pedogenesis and morphogenesis processes. Then, the Hierarchical Analysis Process (AHP) method was applied to determine the relative importance among the natural factors controlling erosive processes. Through Map Algebra the erosion susceptibility map was obtained by integrating the slope, hypsometry, erodibility and erosivity maps. The erosion vulnerability map resulted from the integration of the previous product with the land cover. From the analysis of the results it was identified that the São Francisco River Basin presents predominantly low potential to erosive susceptibility, about 65% of the total area. Regarding the vulnerability of the study area, it was found the predominance of regions with low erosive potential, due to pasture areas. The applied methodology proved to be efficient, robust and suitable for analysis of erosive processes. Thus, the products generated are technical and managerial tools to assist in the decision making necessary to minimize the social and environmental impacts resulting from erosion. In this sense, it is suggested the discipline of surface and subsurface waters and the containment of the slopes, measures established in the scientific literature to avoid, minimize, recover and manage erosive processes in urban and / or rural areas.

Keywords: Geoprocessing. Map Algebra. Hierarchical Analysis Process.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Processos erosivos.....	3
2.2	Suscetibilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos	4
2.3	Geoprocessamento.....	5
3	MATERIAL E MÉTODO	7
3.1	Área de estudo.....	7
3.2	Materiais	7
3.3	Métodos	8
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	12
4.1	Declividade	12
4.2	Hipsometria.....	14
4.3	Erodibilidade	15
4.4	Erosividade	18
4.5	Cobertura do solo	19
4.6	Suscetibilidade aos processos erosivos	20
4.7	Vulnerabilidade aos processos erosivos	22
5	CONCLUSÃO	25
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1 INTRODUÇÃO

Para atender às demandas da sociedade, os recursos naturais vêm sendo constantemente explorados, desencadeando e acelerando desequilíbrios ambientais. Segundo Guerra e Cunha (2000), o uso inadequado dos recursos naturais, nas zonas urbana e rural, é a principal causa da degradação ao meio ambiente. A esta degradação estão associados impactos como poluição, desmatamento, inundação, erosão dos solos e assoreamento dos recursos hídricos superficiais, entre outros.

De acordo com Brady (1989) e Hernani *et al.* (1999), a erosão é o fenômeno mais destrutivo que afeta o solo em âmbito mundial, pois ocasiona a perda acelerada dos nutrientes e matéria orgânica e, conseqüentemente, o seu empobrecimento e a degradação do agroecossistema. Segundo o relatório da FAO (2015), somente a erosão elimina 25 a 40 bilhões de toneladas de solo por ano, reduzindo significativamente a produtividade das culturas e a capacidade de armazenar carbono, nutrientes e água.

Os processos erosivos, segundo Guerra (1998), são controlados pela erosividade da chuva, erodibilidade dos solos/rochas, cobertura vegetal e características das vertentes. Esses fatores, associados ou não, definem a suscetibilidade de ocorrência da erosão natural ou geológica. Já a vulnerabilidade está associada às práticas humanas que intensificam a erosão. Nesse sentido, o desmatamento da vegetação nativa para a implantação da agricultura extensiva, pecuária intensiva, exploração mineral e expansão urbana, é o principal desencadeador da erosão acelerada ou antrópica (NASCIMENTO, 2004).

As técnicas de geoprocessamento são ferramentas essenciais para análise da suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão principalmente de grandes áreas. A partir de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é possível produzir mapas temáticos com maior rapidez, precisão, baixos custos e com facilidade de atualização constante. A geração de mapas pode ser realizada pela compilação de mapas secundários, interpretação visual e automática de imagens de satélite e álgebra de mapas. Dessa forma a integração automática de mapas temáticos é fundamental para a gestão ambiental dos processos erosivos em uma bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica é uma unidade territorial de planejamento ambiental, que possui características essenciais para a integração multidisciplinar entre diferentes sistemas de gerenciamento, estudo e atividade ambiental (BERNARDI, 2012). De

acordo com Botelho (1999, *apud* ALBUQUERQUE, 2013), diversos pesquisadores apontam a bacia hidrográfica como uma unidade natural da superfície terrestre, onde é possível avaliar as inter-relações existentes entre os elementos da paisagem e os processos que atuam na sua estruturação, como a erosão hídrica do solo.

As intervenções humanas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco aceleram os processos erosivos e o assoreamento do canal fluvial. Segundo Medeiros *et al.* (2007), o valor de material particulado em suspensão transportado pelo rio São Francisco era de 69×10^5 t/ano entre 1938 e 1973. Com a construção de 33 barragens, sendo 9 no curso do rio, este valor foi reduzido para $2,28 \times 10^5$ t/ano, impedindo a transferência destes para o mar.

Em decorrência deste processo a região do Baixo São Francisco sergipano vem sofrendo vários impactos ambientais nas últimas décadas, destacando a destruição do povoado do Cabeço, que foi inundado pelo mar. Carvalho (2006), destaca também os impactos ambientais, econômicos e sociais em função da perda de biodiversidade na região.

Diante dos impactos ocasionados pela erosão, nota-se a importância de se realizar uma análise das áreas que estão suscetíveis e vulneráveis a estes processos, através das ferramentas do geoprocessamento. Este estudo serve também de subsídio para a tomada de ações que visem minimizar as adversidades dos impactos nas esferas ambientais, econômicas e sociais.

Posto isso, o presente trabalho visou delimitar as áreas suscetíveis e vulneráveis aos processos erosivos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) no Estado de Sergipe, por meio de técnicas de geoprocessamento. Para atender o objetivo geral foram determinados os seguintes objetivos específicos: compilar e gerar mapas de declividade, geomorfologia, hipsometria, erodibilidade, geologia, pedologia, erosividade e cobertura do solo, espacializar a erosão através do mapa de suscetibilidade e vulnerabilidade; e obter dados que sirvam de contribuição para estudos futuros e auxiliem na tomada de ações mitigadoras necessárias à minimização dos impactos ambientais, econômicos e sociais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordou os aspectos importantes e necessários para a compreensão do tema deste trabalho, englobando, portanto, conceitos relacionados aos processos erosivos, suscetibilidade, vulnerabilidade e geoprocessamento.

2.1 Processos erosivos

A erosão é o processo de desagregação, transporte e deposição das partículas do solo provocada por agentes hídrico e eólico (CUIABANO *et al.*, 2017). Os fatores ambientais e antrópicos exercem influência na erosão dos solos, entretanto, ainda é um grande desafio determinar com precisão a interferência de cada um desses fatores na erosão e o efeito no sistema como um todo (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010). No Brasil, o tipo de erosão mais recorrente é a hídrica. Isso se deve ao fato do país estar geograficamente localizado em uma área tropical, com grande incidência de chuva, acelerando o processo e causando prejuízo tanto ao meio ambiente quanto à socioeconomia (PEREIRA *et al.*, 2003).

Desta forma, provocada pela transferência de energia cinética da gota de chuva que incide no solo exposto, a erosão hídrica é um fator preocupante no processo de degradação do solo. Além da desagregação e lixiviação devido ao impacto e reação química entre água-solo, respectivamente (TOLEDO; DE MARIA; DECHEN, 2012), há o carreamento das partículas desagregadas provocando o assoreamento e poluição e eutrofização dos corpos hídricos, principalmente devido ao uso de fertilizantes e agroquímicos (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010; SANTOS, 2011). Além disso, as gotas de chuva podem provocar o selamento (compactação) da superfície do solo, diminuindo a sua capacidade de infiltração e, conseqüentemente, acelerando o escoamento superficial da água (GUERRA, 1999).

Existem dois tipos de erosão provocadas pelo escoamento da água da chuva pelas vertentes: a erosão laminar e a erosão linear. A erosão laminar é caracterizada pelo regime difuso (não concentrado) e uniforme do escoamento superficial, resultando na remoção homogênea das camadas superficiais do solo, principalmente a matéria orgânica e partículas de argila (MAGALHÃES, 2001), diminuindo a fertilidade do solo (GOBBI *et al.*, 2011). Já a erosão linear é proveniente da concentração do fluxo superficial das águas, resultando em incisões na superfície do

terreno, conhecida como sulcos (ALMEIDA FILHO, 2015). Estes, posteriormente, podem dar origem às ravinas e voçorocas (SALOMÃO, 1999).

2.2 Suscetibilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos

A suscetibilidade do solo aos processos erosivos está condicionada a fatores como chuva (erosividade), tipo do solo/rocha (erodibilidade), e a topografia do terreno (declividade e comprimento de encosta). A associação destes fatores determina a forma e a intensidade de uma determinada área à erosão.

A erosividade, segundo Wischmeier e Smith (1958), é a capacidade da chuva em causar erosão no solo, e está atribuída a duração e frequência da chuva, quanto mais longa e frequente for, maiores serão os danos. Bertoni e Lombardi Neto (2010) expressa a relação entre a velocidade da água e o seu poder erosivo através da Equação (1):

$$Ec = \frac{mV^2}{2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

E_c = energia cinética;

m = massa de água incidente;

V = velocidade terminal da gota durante o impacto.

A erodibilidade é o grau de resistência do solo/rocha em erodir, caracterizada pela interação entre as características físicas (textura, estrutura, permeabilidade, densidade), químicas, mineralógicas e biológicas do mesmo (CORRECHEL, 2003), tornando-o mais propenso à erosão do que outro a depender de tais propriedades.

Outro fator importante na suscetibilidade dos solos a processos erosivos é a topografia, principalmente em função da declividade e do comprimento das encostas (STEPHAN, 2010). Em locais onde o terreno é plano ou possui pequenas elevações, a velocidade do escoamento é menor, prevalecendo a infiltração da água no solo (WEILL; PIRES NETO, 2007). Entretanto, nos pontos mais altos, a velocidade do escoamento é maior (WEILL; PIRES NETO, 2007), e menos tempo haverá para a água infiltrar no solo. O mesmo acontece para o comprimento da encosta, quanto maior for, mais alta será a velocidade do escoamento, favorecendo os processos erosivos.

Com isso, percebe-se que a perda de solo está relacionada com o declive do terreno e pode ser expressa por Bertoni (2010) por meio da Equação (2):

$$T = 0,145D^{1,18} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

T = perda de solo em quilograma/ unidade de largura/ unidade de comprimento;

0,145 = constante de variação;

D = grau de declive do terreno, em porcentagem.

A vulnerabilidade natural é a incapacidade de uma unidade espacial resistir e/ou se recuperar após sofrer impactos negativos (SCOLFORO *et al.*, 2008). A vulnerabilidade a erosão é decorrente das atividades antrópicas e está condicionada aos fatores de cobertura vegetal e uso do solo. A vegetação é um dos principais fatores que protegem o solo dos agentes erosivos. De acordo com Almeida Filho (2015), a cobertura vegetal evita a desagregação de partículas do solo, diminui a velocidade do escoamento superficial e aumenta a porosidade através das raízes. Entretanto, áreas com solo exposto, sem manejo, aumentam a vulnerabilidade à erosão do terreno, pois favorecem a desagregação das partículas do solo através do impacto da gota da chuva e o aumento do escoamento superficial. A exploração dos recursos naturais com práticas conservacionistas inadequadas de uso e manejo do solo intensifica o processo erosivo (PEREIRA *et al.*, 2002).

2.3 Geoprocessamento

O geoprocessamento é um conjunto de técnicas que permite manipular e analisar dados georreferenciados, resultando em modelagens prognósticas do ambiente natural e antropizado (FITZ, 2008). Além disso, possibilita a integração de mapas temáticos, o que torna uma ferramenta essencial para a elaboração de estudos integrados do ambiente (COELHO, 2009). Tais atividades são executadas por sistemas de processamento de dados geográficos, conhecidos como Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Segundo Fitz (2008) o SIG pode ser definido como:

“... sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido.”

Os SIGs vêm sendo bastante utilizados para analisar de maneira qualitativa e quantitativa os processos erosivos, em função da facilidade de manipulação dos dados geográficos e da confiabilidade dos resultados da predição das áreas suscetíveis e vulneráveis à erosão (SANTOS, 2011 *apud* LIM *et al.*, 2005). Câmara

(1995) descreve que as principais características do SIG é integrar, informações espaciais numa única base de dados e oferecer mecanismos para combinar informações através de algoritmos de manipulação e análise. Um destes mecanismos é a Álgebra de Mapas (AM). Através deste é possível obter produtos cartográficos de suscetibilidade e vulnerabilidade erosiva conforme pode ser visto na Equação (3):

$$AM = (P1 \times C1) \times (P2 \times C2) \times (P3 \times C3) \times (P4 \times C4) \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

Pi = Peso do critério de possibilidade “i”;

Ci = Critério de possibilidade “i”.

Além disso, é possível aliar ao SIG métodos que auxiliam na tomada de decisão utilizando modelagem matemática para comparar cenários e alternativas, de modo a apresentar soluções adequadas aos órgãos competentes (SILVA; BELDERRAIN, 2005). Segundo Gdoura, Anane e Jellali (2014), um dos poucos métodos de tomada de decisão que podem ser integrados com um SIG é o Processo de Análise Hierárquica (AHP). Este processo de análise possui elementos capazes de avaliar as potencialidades ou restrições inerentes ao processo decisório, influenciando positivamente na tomada de ações (PIMENTA *et. al.* 2019).

O método AHP foi desenvolvido na década de 70 por Thomas Saaty, e consiste na criação de uma ordenação de decisão composta por níveis hierárquicos, que permitem uma visão global das relações inerentes ao processo. Para estabelecer a importância relativa de cada fator da hierarquia são elaboradas matrizes de comparação para cada nível, onde os resultados das matrizes são ponderados entre si (SILVA; NUNES, 2009). A ponderação é feita para cada critério (Tabela 1), por meio de comparações de pares, usando a escala de Saaty de números absolutos onde se atribui valores numéricos tanto quantitativos como qualitativos aos julgamentos (PINESE JÚNIOR, 2010).

Tabela 1 – Escala de comparadores com os respectivos pesos de importância.

Valores	Importância Mútua
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

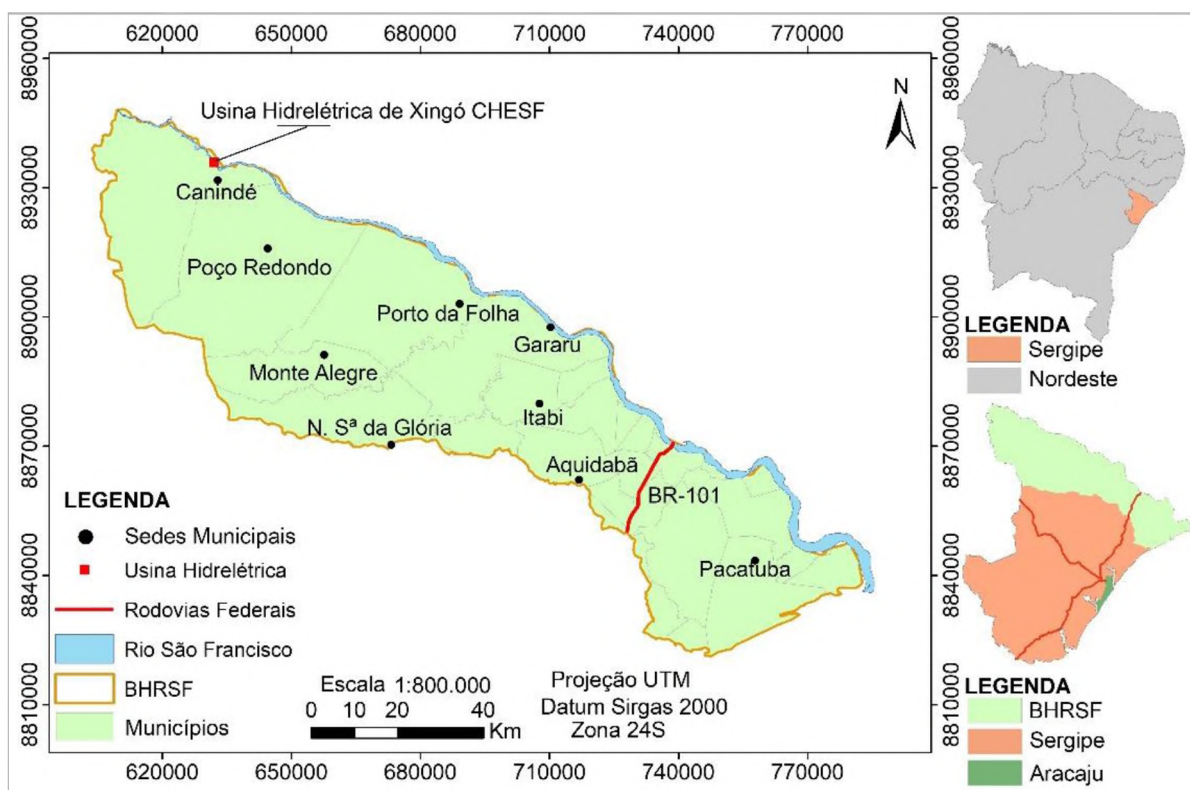
Fonte: Modificado de Rezende (2017).

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco no Estado de Sergipe, à margem esquerda da foz do seu rio principal (Figura 1). Está delimitada pelas coordenadas geográficas 38°00'03" e 36°23'56" de longitude Oeste e 9°30'59" e 10°31'10" de latitude Sul. Abrange 27 municípios, totalizando uma área de 7.345 km², o que equivale a 33,5% do território estadual.

Figura 1 - Mapa de localização e acesso da área de estudo.



Fonte: A autora

3.2 Materiais

Os materiais utilizados foram: (i) dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 metros do Projeto Topodata, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011); (ii) mapa geológico disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2004) no GeoSGB, <http://geosgb.cprm.gov.br> (antigo Geobank acessado em 23 de maio de 2019); (iii) dados de hidrografia, isoietas e uso da terra do Atlas Digital sobre Recursos Hídricos de Sergipe (SEMARH, 2013); e o programa de geoprocessamento QGIS, versão 2.14.

3.3 Métodos

Inicialmente os dados de interesse foram importados para o QGIS, onde foram confeccionados os mapas de declividade, hipsometria, erosividade, erodibilidade, cobertura do solo, geomorfologia, geologia e pedologia. Estes mapas foram reprojitados automaticamente para o Sistema de Projeção UTM – Universal Transversa de Mercator, Datum Sirgas 2000 e Zona 24S.

Os mapas hipsométrico e declividade foram confeccionados a partir dos dados SRTM, cujos valores de elevação do terreno foram agrupados em classes com intervalo altimétrico de 100m e as classes de declividade foram estabelecidas de acordo com a classificação proposta pela EMBRAPA (1979), que relaciona a morfometria com a morfografia do relevo. Os parâmetros morfométricos descrevem o relevo quanto aos seus aspectos quantitativos enquanto que os parâmetros morfográficos correspondem à forma do relevo, como descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de declividade e as formas de relevo da BHRSF.

Declividade (%)	Relevo
0 - 3	Plano
3 – 8	Suave Ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte Ondulado
45 – 75	Montanhoso
>75	Forte Montanhoso

Fonte: EMBRAPA (1979).

O mapa de erosividade da chuva foi obtido com os dados da precipitação média anual da bacia disponibilizados pelo atlas supracitado e dividido em seis intervalos de classes. O mapa de erodibilidade foi confeccionado pelo Interpolador de Kernel, com função quártica, onde as linhas de drenagem da bacia foram transformadas em uma malha pontos. A densidade de drenagem foi calculada com base na quantidade de número de pontos representativos de cada linha de drenagem. As classes de erodibilidade foram definidas como muito baixa, baixa, moderadamente baixa, moderadamente alta, alta e muito alta.

Os mapas de pedologia, geomorfologia e geologia foram compilados e modificados de SEMARH (2013), JICA (2000) e CPRM (2004), respectivamente. Com esses produtos cartográficos foi possível associar visualmente as características das rochas e solos à densidade de drenagem, e assim identificar as áreas da bacia com maior potencial erosivo.

Para obter o mapa de cobertura do solo foi feito uma associação das classes com características semelhantes da tabela de atributos e das características das

classes temáticas. Este processo teve como objetivo deixar a imagem visualmente organizada e com informações compreensíveis, resultando num mapa reclassificado em: floresta, dunas, pastagem, cultivo agrícola, corpos d'água e áreas degradadas.

Após delimitar os mapas, realizou-se a atribuição de peso à cada classe temática de acordo com o seu grau de importância na suscetibilidade e vulnerabilidade erosiva. As ponderações foram feitas a partir da metodologia apresentada por Crepani (2001). Este autor propõe a atribuição de valores entre 1,0 e 3,0, preconizado por Tricart, (1977) em função das condições predominantes de pedogênese e morfogênese.

Os valores próximos a 1,0 estão associados à pedogênese, que são as unidades de paisagem consideradas estáveis e com equilíbrio dinâmico, 2,0 são atribuídas a condições intermediárias, e 3,0 estão associados à morfogênese, que apresenta condições instáveis e predominância de características intrínsecas desencadeadoras de processos erosivos naturais ou geológicos.

Os pesos para cada classe foram distribuídos em cinco intervalos iguais, resultando num quintil. O quintil é um método estatístico de medida separatriz que permite cada classe ficar com 20% de seus elementos, de forma que a mediana esteja localizada no centro (RIBEIRO, 2015). Assim, os valores estabelecidos para cada classe temática encontram-se na Tabela 3 e Tabela 4 a seguir:

Tabela 3 – Pesos para as classes de declividade, hipsometria, erodibilidade e erosividade.

Pesos	Declividade	Hipsometria	Erodibilidade	Precipitação
1	0 – 3%	< 100 m	Muito Baixa	600 – 730 mm
1,4	3 – 8%	100 – 200 m	Baixa	730 – 890 mm
1,8	8 – 20%	200 – 300 m	Moderadamente baixa	890 – 1020 mm
2,2	20 – 45%	300 – 400 m	Moderadamente Alta	1020 – 1050 mm
2,6	45 – 75%	400 – 500 m	Alta	1050 – 1280 mm
3	>75%	>500 m	Muito Alta	1280 – 1400 mm

Fonte: A autora.

Tabela 4 – Pesos correspondentes às classes de cobertura do solo.

Pesos	Uso do solo
1	Floresta
1,4	Dunas
1,8	Pastagem
2,2	Cultivo agrícola
2,6	Corpos d'água
3	Áreas degradadas

Fonte: A autora.

Após a elaboração dos mapas temáticos com suas respectivas classes, determinou-se a importância relativa entre os fatores de declividade, hipsometria, erodibilidade e erosividade. Para isso foi utilizado o Processo de Análise Hierárquica

(AHP), que é um método empregado para auxiliar a tomada de decisões complexas. Construiu-se uma matriz quadrada de comparação pareada, estabelecendo a hierarquia de menos suscetível para mais suscetível. Nesta matriz cada variável da coluna esquerda teve dominância em relação a variável da linha do topo (SAATY, 1994) (Tabela 5). Os valores da diagonal são unitários, pois uma variável comparada a ela mesma é igualmente importante (SANTOS et al. 2010).

Tabela 5 – Matriz quadrada de comparação pareada.

Variáveis	Erosividade	Erodibilidade	Hipsometria	Declividade
Erosividade	1	1/3	1/5	1/7
Erodibilidade	3	1	1/3	1/5
Hipsometria	5	3	1	1/3
Declividade	7	5	3	1

Fonte: A autora.

Depois de estabelecer os pesos de cada variável verificou-se o autovalor máximo, $\lambda_{\text{máx}}$ e a razão de consistência. O autovalor máximo é calculado pela multiplicação da matriz de comparação pelo vetor coluna w , seguido da divisão desse novo vetor encontrado, Aw , pelo primeiro vetor w , a partir da Equação (4) abaixo:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{1}{n} \sum \frac{Aw}{w} \quad \text{Eq. (4)}$$

A partir da divisão do índice de consistência (IC) pela inconsistência aleatória média (IAM), Equação (5), calcula-se a razão de consistência (RC), Equação (6):

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad \text{Eq. (6)}$$

De acordo com Saaty (1994), o resultado da razão deve apresentar valor menor que 0,10 e o valor do $\lambda_{\text{máx}}$ estar próximo do número de variáveis utilizadas para que haja consistência dos dados. Dessa forma, ao aplicar o método AHP obteve-se o resultado de 0,046 para a razão de consistência e 4,123 para o $\lambda_{\text{máx}}$. A partir do cálculo da matriz, geraram-se os pesos estatísticos de cada variável utilizados para a confecção do mapa de suscetibilidade erosiva (Tabela 6).

Tabela 6 – Pesos das variáveis utilizadas na geração do mapa de suscetibilidade à erosão.

Mapa	Pesos
Erosividade	0,057
Erodibilidade	0,122
Hipsometria	0,264
Declividade	0,558

Fonte: A autora.

A declividade tem influência fundamental no aumento da velocidade do escoamento superficial, uma vez que quanto maior o declive, maior a energia cinética

da água da chuva e, conseqüentemente, maior a suscetibilidade aos processos erosivos, sendo, por essa razão, o critério de maior importância na hierarquia.

A erosividade, por sua vez, teve menor importância em função da variabilidade climática ao longo da bacia, apresentando, na região de estudo, longos períodos de estiagem. No estudo feito por Rocha (2009), foi sugestionado que as taxas de erosão medidas na bacia não estão relacionadas às precipitações, mas ao aumento da vazão do rio, decorrente do aumento da precipitação no Alto e Médio São Francisco.

A atribuição dos pesos para o mapa de vulnerabilidade foi baseada no empirismo, partindo da compreensão das características do ambiente alterado pelas ações antrópicas e pela síntese das informações pesquisadas acerca da influência negativa do homem na BHRSF. O resultado desse entendimento está na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7– Pesos das variáveis utilizadas na geração do mapa de à erosão.

Mapa	Pesos
Suscetibilidade erosiva	1,8
Cobertura do solo	3,0

Fonte: A autora.

Com as variáveis ponderadas, foi realizada a álgebra dos mapas de declividade (D), hipsometria (H), erodibilidade do solo (K) e erosividade da chuva (R), através da Equação (7):

$$SE = (R \times 0,057) \times (K \times 0,122) \times (H \times 0,264) \times (D \times 0,558) \quad \text{Eq. (7)}$$

Obteve-se o mapa de vulnerabilidade a erosão (VE) a partir da integração dos mapas de suscetibilidade erosiva (SE) e cobertura do solo (CS) a partir da aplicação da Equação (8).

$$VE = (SE \times 1,8) \times (CS \times 3,0) \quad \text{Eq. (8)}$$

Estas operações resultaram nos mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos, objeto de estudo, classificados em muito baixa, baixa, moderadamente baixa, moderadamente alta, alta e muito alta.

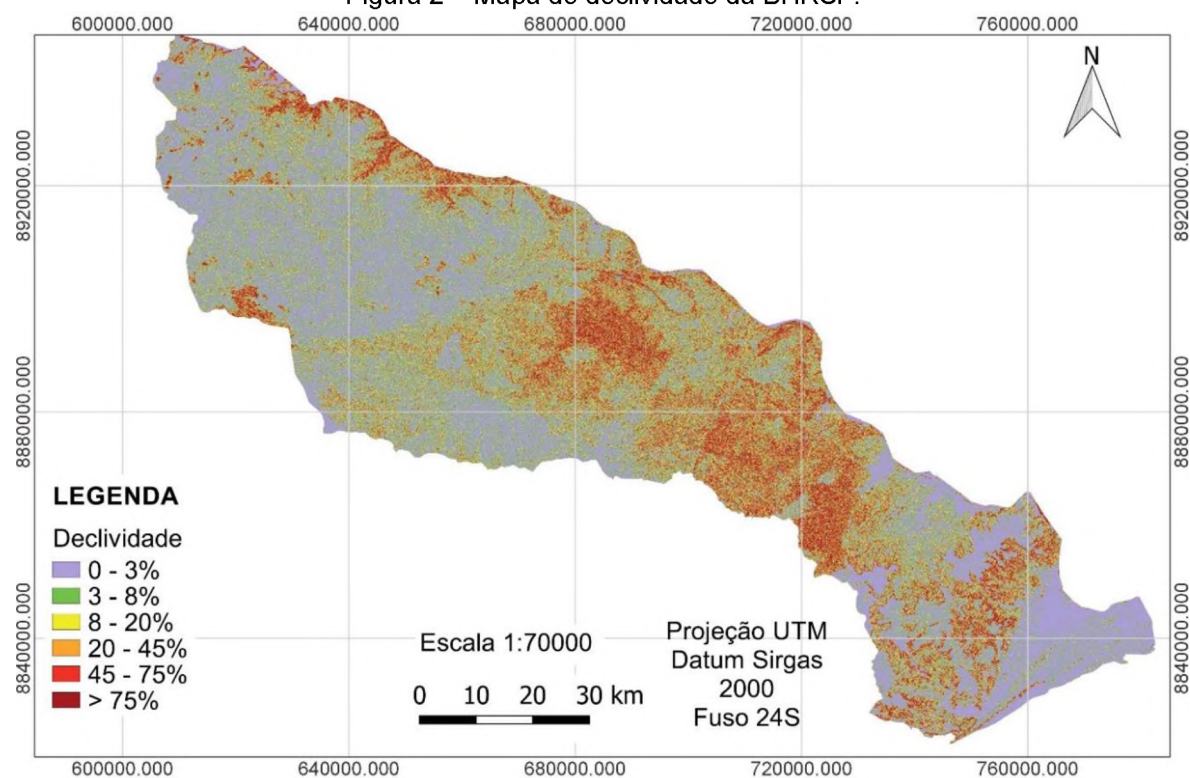
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Declividade

As classes de declividade (Figura 2) e de relevo (Figura 3) representam a morfometria e a morfografia da BHRSF, respectivamente; e retratam os processos geológicos exógenos à luz da morfogênese e pedogênese. Nesta prevalecem a formação do solo e naquela, a do relevo, que de acordo com Tricart (1977), indicam a estabilidade e instabilidade do terreno frente aos processos erosivos.

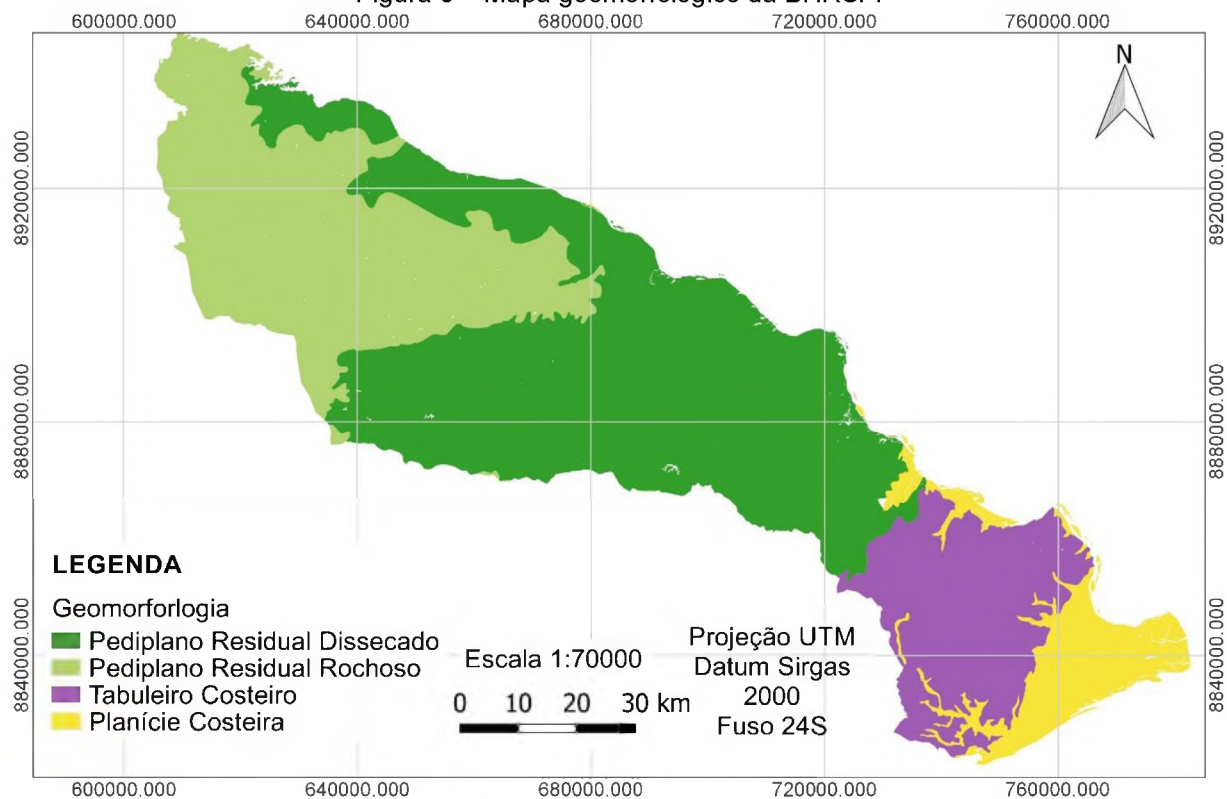
Nas classes de declividade que variam de 0 a 8% predominam os relevos plano e o suave ondulado, e ocupam 45% (3162,3 Km²) e 25% (1768,3 Km²) da bacia, respectivamente. As menores declividades favorecem o processo de infiltração da água da chuva e a formação do solo, indicando terrenos estáveis com relação à erosão. Nas baixas declividades, a ação da gravidade é menor e, conseqüentemente, a intensidade do escoamento superficial e do transporte de sedimentos são baixos, contendo os processos erosivos e com tendência de formação de elúvios. Essas declividades se apresentam por toda a área de estudo, predominando nas formas de relevo pediplano rochoso e planície costeira. As classes de declividade entre 8% (936 Km²) e 45% (512 Km²) representadas por relevos ondulados a forte ondulados, também estão distribuídas por toda a bacia, porém concentradas nas formas de relevo pediplano dissecado e tabuleiro costeiro, indicando estágio intermediário dos processos pedo-morfogenéticos, com tendência de formação de colúvios. Em oposição às baixas declividades, nas altas declividades, a ação da gravidade é maior, e maior a concentração do escoamento superficial e do transporte de sedimentos, deflagrando e intensificando os processos erosivos. Essas classes de declividade se concentram nas mesmas regiões das declividades intermediárias (formas de relevo pediplano dissecado e tabuleiro costeiro), diferenciando pelo maior grau de dissecação do relevo. Apresentam relevo montanhoso (75% - 589,8 Km²) e forte montanhoso (>75% - 169,9 Km²), sendo assim as regiões de maior suscetibilidade à erosão.

Figura 2 – Mapa de declividade da BHRSF.



Fonte: A autora.

Figura 3 – Mapa geomorfológico da BHRSF.



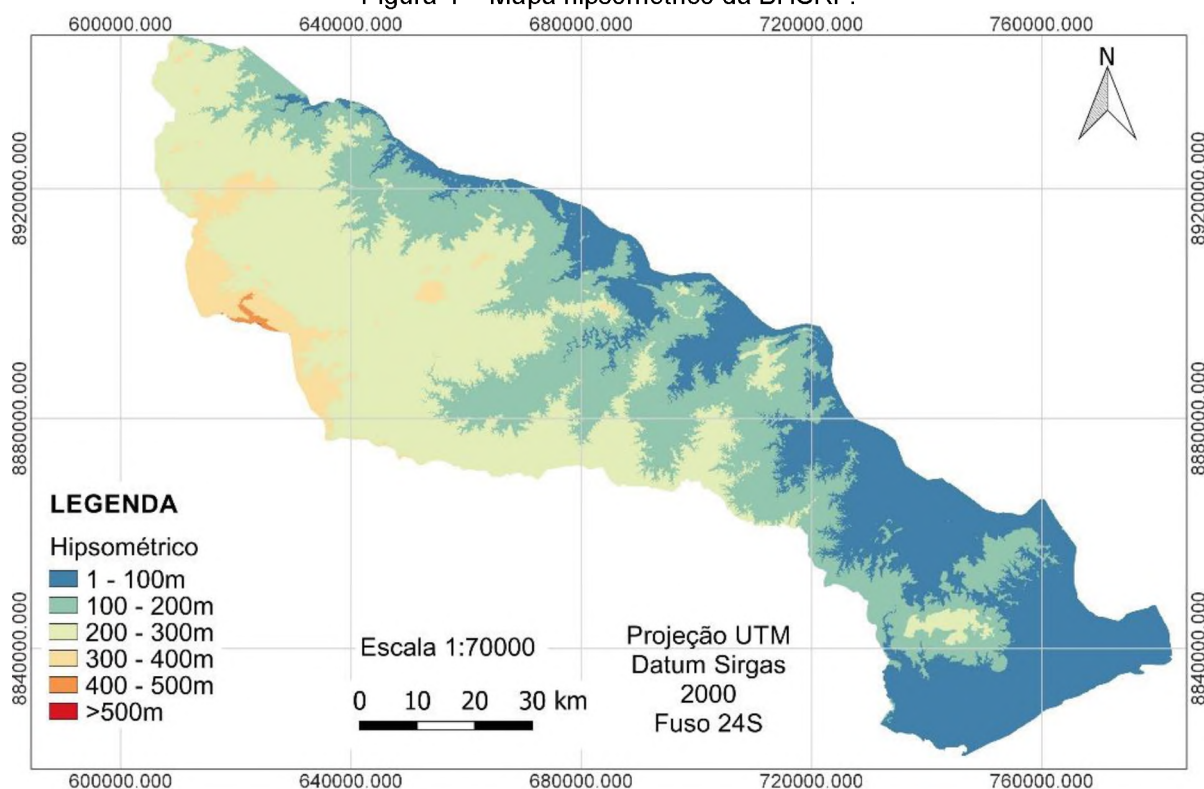
Fonte: Modificado da JICA (2000).

4.2 Hipsometria

Como não foi realizado o mapeamento do comprimento de rampa, as classes hipsométricas (Figura 4) foram relacionadas com as classes morfográficas da EMBRAPA (1979) E IPT (1981). De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2010), à medida que o comprimento da vertente aumenta, as águas da chuva ganham volume proporcionalmente, bem como a sua velocidade de escoamento, que aumentará progressivamente. Assim, a partir do mapa hipsométrico foi possível inferir a influência do comprimento da vertente nos processos erosivos.

A área de estudo apresentou: 29% (2039 Km²) de altitude até 100 metros, representado por relevo plano concentrado na planície costeira, tabuleiro costeiro e porções no entorno do rio São Francisco do pediplano dissecado; 31% (2205 Km²) entre 100 e 200 metros contornando as formas de relevo do tabuleiro costeiro e pediplano dissecado; e 36% (2606 Km²) com altitudes variando entre 200 e 300 metros, concentradas no pediplano rochoso. As altitudes superiores a 400 metros são inexpressivas na área de estudo, apresentando somente 0,2% (12 Km²) do total, sendo representada pela Serra Negra, localizada no município de Poço Redondo, ponto mais alto de Sergipe. Dessa forma, nas áreas mais altas, à montante da bacia, os processos erosivos tendem a ser menos acentuados do que na jusante, região esta que estará propensa à formação de depósitos de sedimentos aluvionares e assoreamento dos corpos hídricos superficiais.

Figura 4 – Mapa hipsométrico da BHSRF.

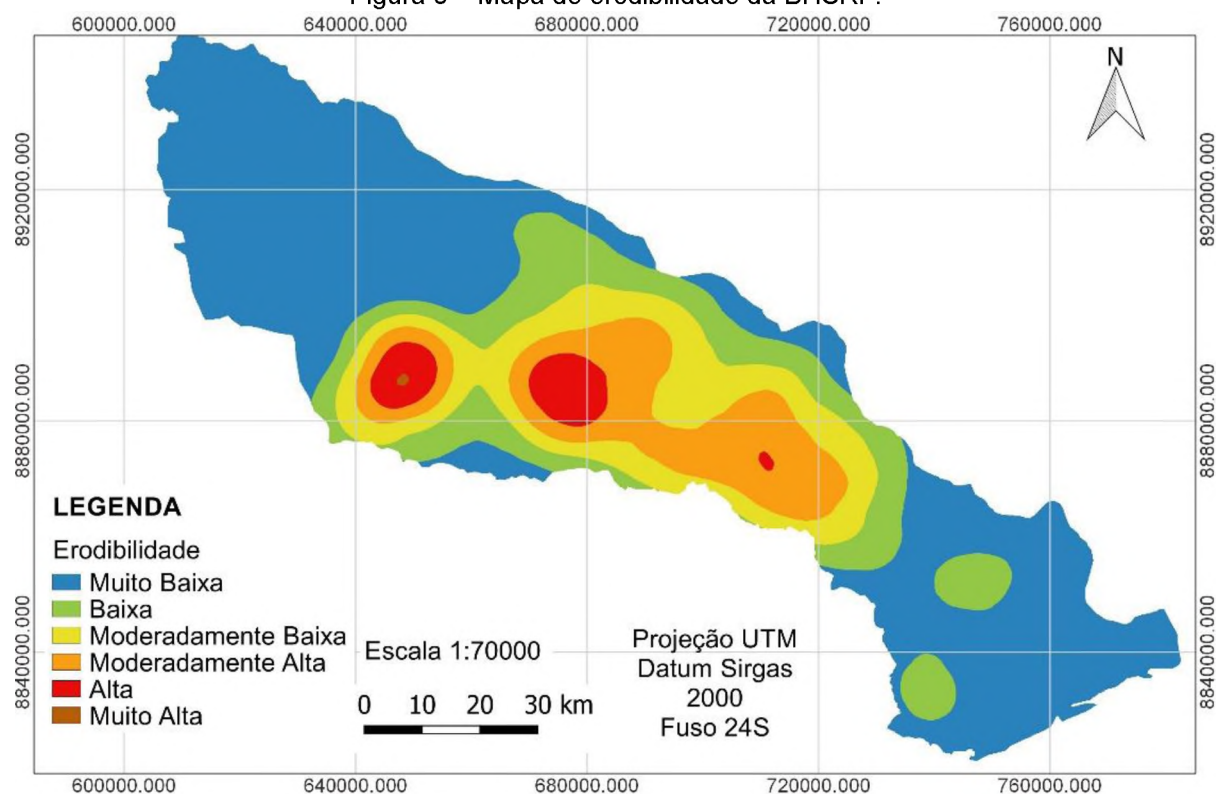


Fonte: A autora.

4.3 Erodibilidade

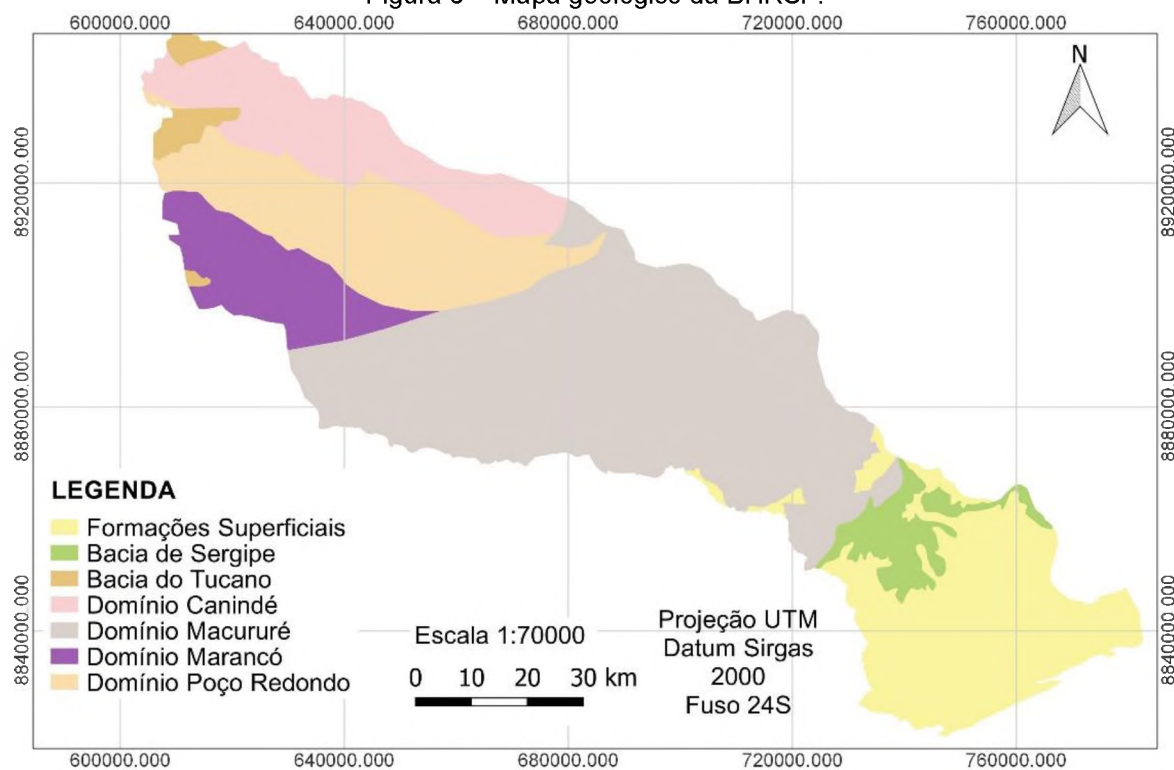
Como foi visto na metodologia, a erodibilidade da rocha/solo foi obtida por meio do Interpolador Kernel aplicada à densidade de drenagem da bacia, podendo ser visto na Figura 5. Dos dados extraídos do mapa obtiveram-se as seguintes proporções: 54% (4002,8 Km²) da área apresenta erodibilidade muito baixa, 17% (1215,1 Km²) baixa, 13,5% (990 Km²) moderadamente baixa, 12,2% (892,7 Km²) moderadamente alta e 3,2% (238,5 Km²) alta. Já a classe de erodibilidade muito alta foi inexpressível. As figuras 6 e 7 correspondem, respectivamente, aos mapas de geologia e solos da área de estudo, gerados para auxiliar na identificação e caracterização das áreas com potencial erosivo.

Figura 5 – Mapa de erodibilidade da BHSRF.



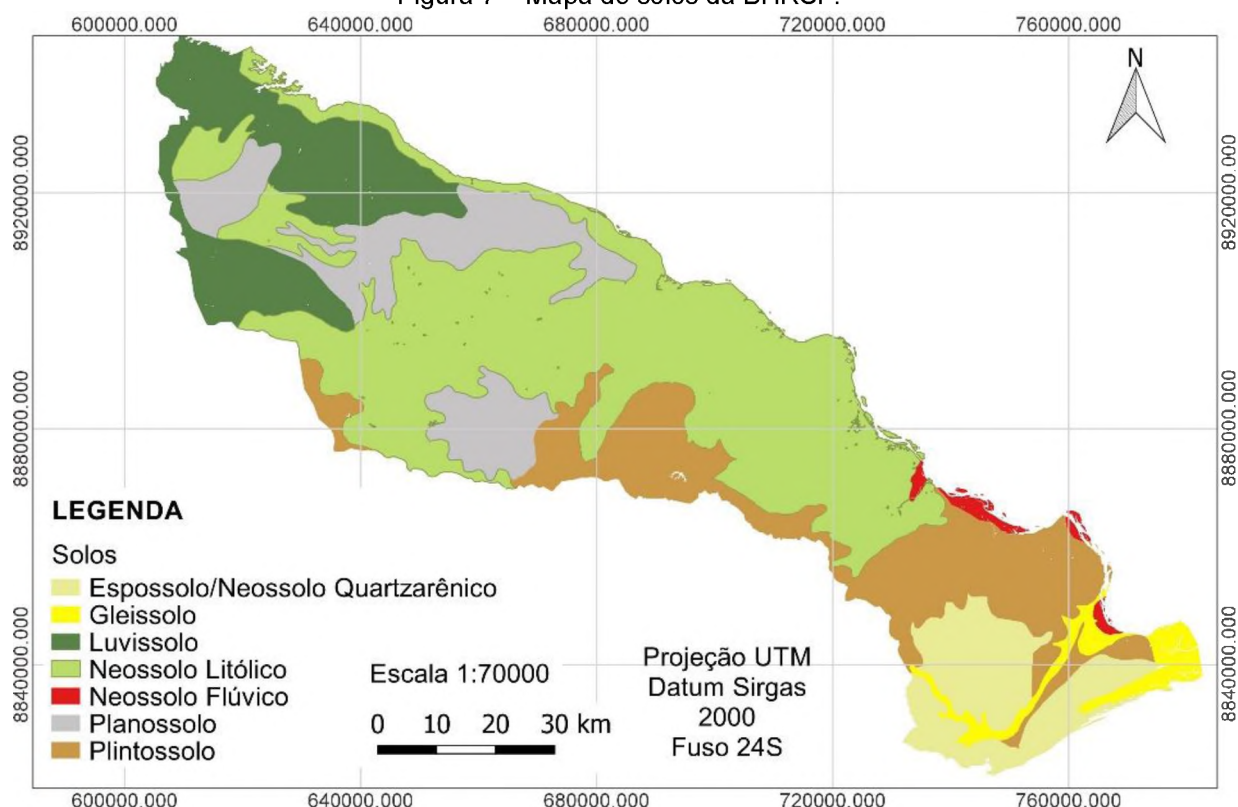
Fonte: A autora.

Figura 6 – Mapa geológico da BHSRF.



Fonte: Modificado de Santos et al. (1998)

Figura 7 – Mapa de solos da BHRSF.



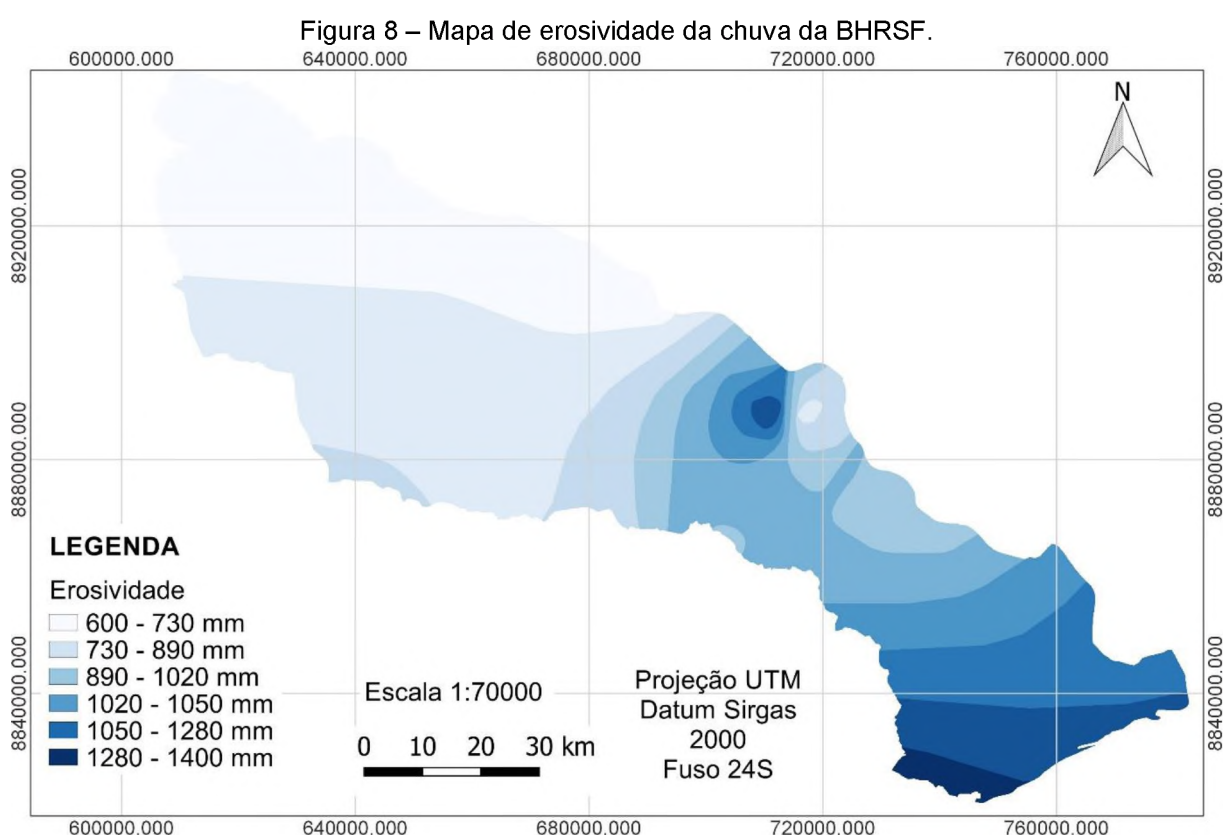
Fonte: Modificado da Jacomine et al. (1975)

De acordo com os mapas apresentados, os pontos que apresentam baixa, moderadamente baixa, moderadamente alta e alta densidade de drenagem estão distribuídos na região centro-oeste da bacia. Situam-se geologicamente no Domínio Macururé, pertencentes a Faixa de Dobramentos Sergipana. As rochas metassedimentares do Grupo Macururé na área de estudo são compostas principalmente por micaxistos, metassiltitos, metagrauvacas e metarritimitos (SANTOS et al., 1998). Sobre essas rochas predominam tipologias pedogênicas friáveis facilmente erodíveis, como os Neossolo Litólico e Planossolo, em oposição ao Plintossolo, de maior resistência à erosão (EMBRAPA, 2006; BARROS *et. al.* 2018).

Segundo Santos e Nascimento (2018b), as bacias hidrográficas que possuem alta densidade de drenagem são compostas por solos impermeáveis. Essa afirmativa foi constatada na área de estudo, pois as regiões que apresentaram erodibilidade moderadamente alta e alta estão sobre os Neossolo Litólico e Planossolo, que possuem baixa permeabilidade. Esta, associada a pequena espessura dos solos predominantes na BHRSF são fatores agravantes, pois contribuem para um intenso escoamento superficial, favorecendo os processos erosivos.

4.4 Erosividade

Com os valores de precipitação média anual espacializados dentro do limite da bacia (Figura 8), foi possível perceber variabilidades significativas ao longo da sua extensão. A faixa litorânea é o local de maior precipitação, entre 1280 e 1400 mm, correspondendo a 513 Km² (7,1%) da extensão total, e a região semiárida, a de menor precipitação, entre 600 mm (26%) e 890 mm (27%). As áreas centrais são receptoras de grandes volumes de chuva intermediárias, variando de 890 a 1280 mm, o que correspondeu proporcionalmente às áreas de 1010, 9 Km² (14%) e 1072, 1 Km² (15%), respectivamente.



Fonte: A autora.

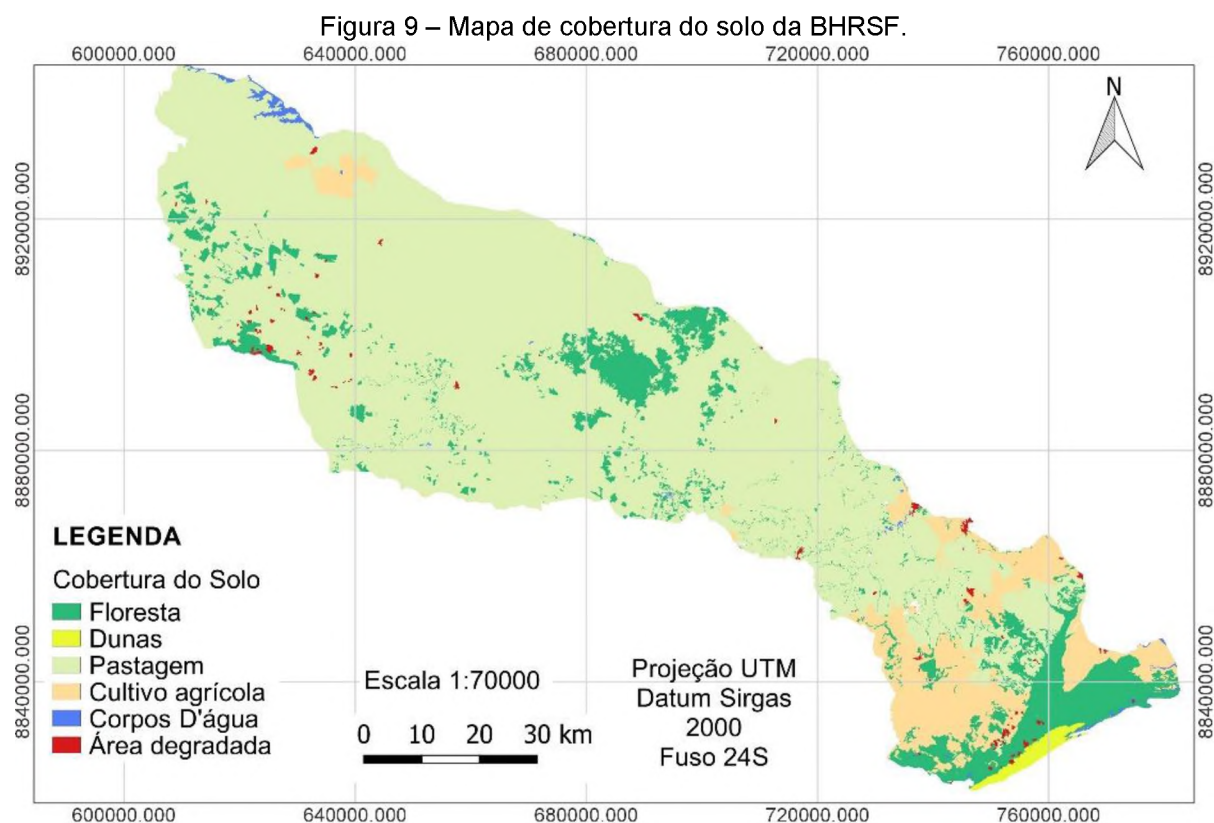
Bertoni e Lombardi Neto (2010) afirmam que o volume e a velocidade das enxurradas estão relacionados ao grau de declividade do terreno. Comparando o mapa de erosividade (Figura 8) com o da declividade (Figura 2), nota-se que a região central além apresentar grandes declives, recebe grandes volumes de chuva. Assim, pode-se inferir que nessas condições, a velocidade de escoamento da água da chuva é grande, ocasionando menores taxas de infiltração e maior intensidade erosiva.

O escoamento superficial irá percorrer pelas encostas até chegar à planície costeira, onde perderá sua força devido às baixas declividades. Esta mesma região é

responsável por receber a maior quantidade de água precipitada na bacia. Logo, esses dois fenômenos associados condicionam às áreas costeiras a eventos de alagamentos, enchentes e inundações. Diante do exposto, pode-se constatar que a erosividade da chuva poderá ser um agente bastante favorecedor à erosão tanto na região central, quanto na planície costeira da bacia.

4.5 Cobertura do solo

Analisando a Figura 9, percebe-se que houve uma grande supressão da cobertura vegetal para converter em áreas de pastagens e cultivo agrícola. A pastagem é característica na área de estudo devido à criação de gado de leite, sendo a região conhecida como Bacia Leiteira de Sergipe. Por outro lado, os cultivos agrícolas são característicos dos perímetros irrigados de Propriá, Cotingiba e Betume, que representam 10% (685 Km²) da bacia. Estes perímetros surgiram em locais onde a mata ciliar foi carregada pela erosão nos taludes do rio São Francisco (HOLANDA *et. al.* 2009).



Fonte: Modificado da Semarh (2013).

As dunas se apresentam numa pequena faixa litorânea, sendo representada por aproximadamente 0,6% (45 Km²) do território da bacia. Os corpos d'água

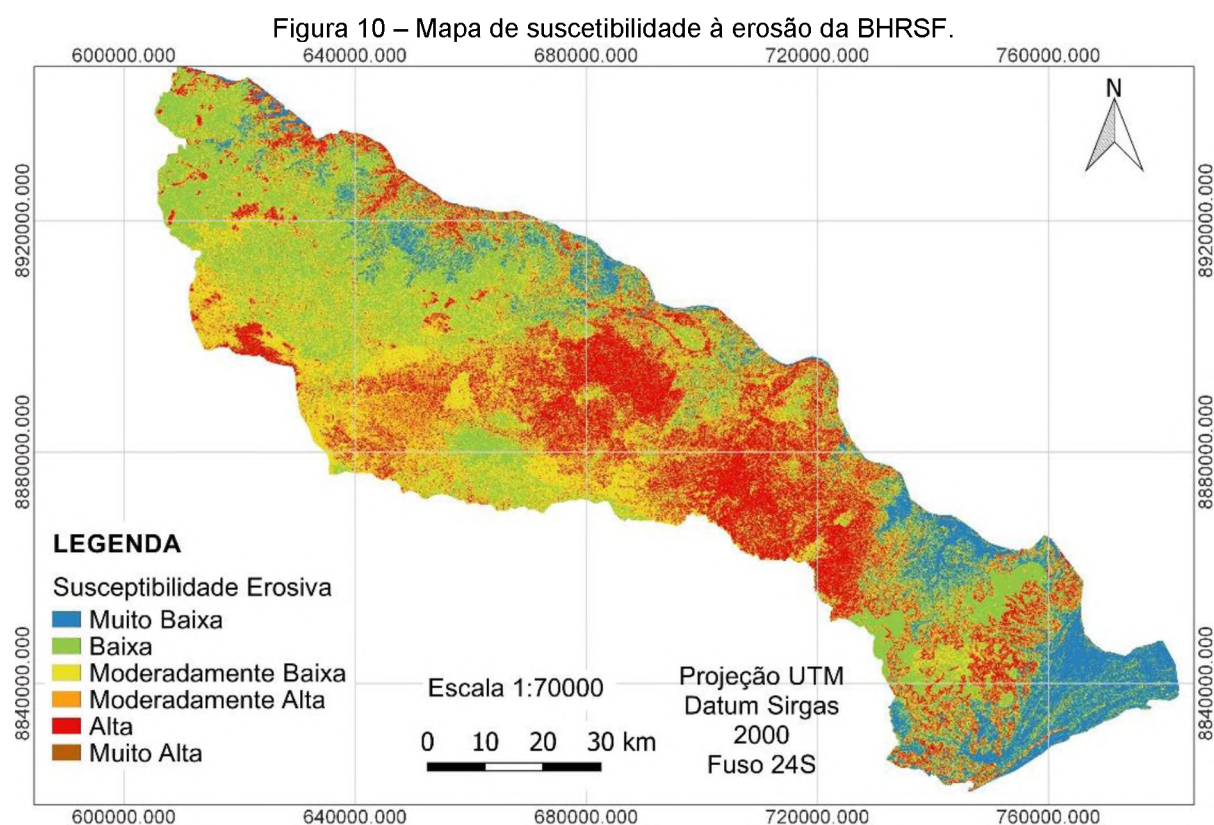
correspondem a 0,5% (38 Km²) e as áreas degradadas 0,4% (31 Km²) da área da BHRSF.

As áreas de florestas (865,6 Km²) são muito inferiores às áreas de pastagens (5501,7 Km²), correspondendo, respectivamente, as proporções de 12% e 77% da extensão total, se mostrando uma bacia com alto potencial de degradação ambiental. Visto que é a principal responsável pelo abastecimento de água do Estado, é necessário que a mesma seja monitorada e que as pastagens, principalmente próximo aos corpos hídricos e em áreas com maior declive, sejam recuperadas e conservadas.

Além disso, a pouca vegetação encontrada na bacia intensifica os processos erosivos, demandando de manejo adequado para reduzir o escoamento superficial e o carreamento de sedimentos para os corpos hídricos, sem que comprometa a qualidade das águas.

4.6 Suscetibilidade aos processos erosivos

Como descrito na metodologia, o mapa de suscetibilidade a erosão da bacia hidrográfica do rio São Francisco foi obtido através da integração dos mapas de declividade, hipsometria, erodibilidade e erosividade. O resultado dessa síntese pode ser visto na Figura 10 e demonstrada na Tabela 8.



Fonte: A autora.

Tabela 8 – Suscetibilidade à erosão por classe (em % e Km²).

Suscetibilidade	Área (%)	Área (Km²)
Muito Baixa	11,4	815,6
Baixa	28,2	2013,6
Moderadamente Baixa	25,7	1836,4
Moderadamente Alta	14,6	1043,9
Alta	20,1	1438,3
Muito Alta	0,1	7,4

Fonte: A autora.

Para a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco foram identificadas o predomínio das classes muito baixa, baixa e moderadamente baixa de suscetibilidade a erosão, que somadas totalizam 65% da área total. Estas classes são evidenciadas em locais de baixos declives, hipsometria elevada, erodibilidade muito baixa e precipitação entre 600 e 890 mm.

Respostas semelhantes a estas também foram obtidas por Santos (2019) na análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Japaratuba – SE, utilizando a mesma metodologia aqui adotada. Neste trabalho a autora obteve o percentual de 78,78% da área de estudo apresentando classes muito baixa e moderadamente baixa de fragilidade ambiental potencial, aqui denominada suscetibilidade erosiva. Essas classes se concentraram em regiões de baixa declividade, baixa erodibilidade e alta precipitação, se tornando assim áreas propícias ao assoreamento de sedimentos gerados nas áreas de maior fragilidade ambiental.

No estudo elaborado por São Miguel *et. al.* (2018) na bacia do ribeirão São Pedro – MS, foi considerado para a elaboração do mapa de fragilidade ambiental os dados referentes à declividade, solos, áreas prioritárias, clima, uso da terra e cobertura vegetal da bacia. Assim, foi encontrada também a predominância da classe baixa de fragilidade, cerca de 60,44% do total da área da bacia.

Portanto, mesmo que a BHRSF tenha predominância de áreas com baixa suscetibilidade a erosão, estes resultados não podem ser negligenciados, mas sim tratados como relevante subsídio ao gerenciamento e monitoramento da área. Considerando os aspectos como a extensão, presença de relevos ondulados e de solos impermeáveis e os maiores índices de pluviosidade à montante da bacia, podem causar sérios danos socioambientais.

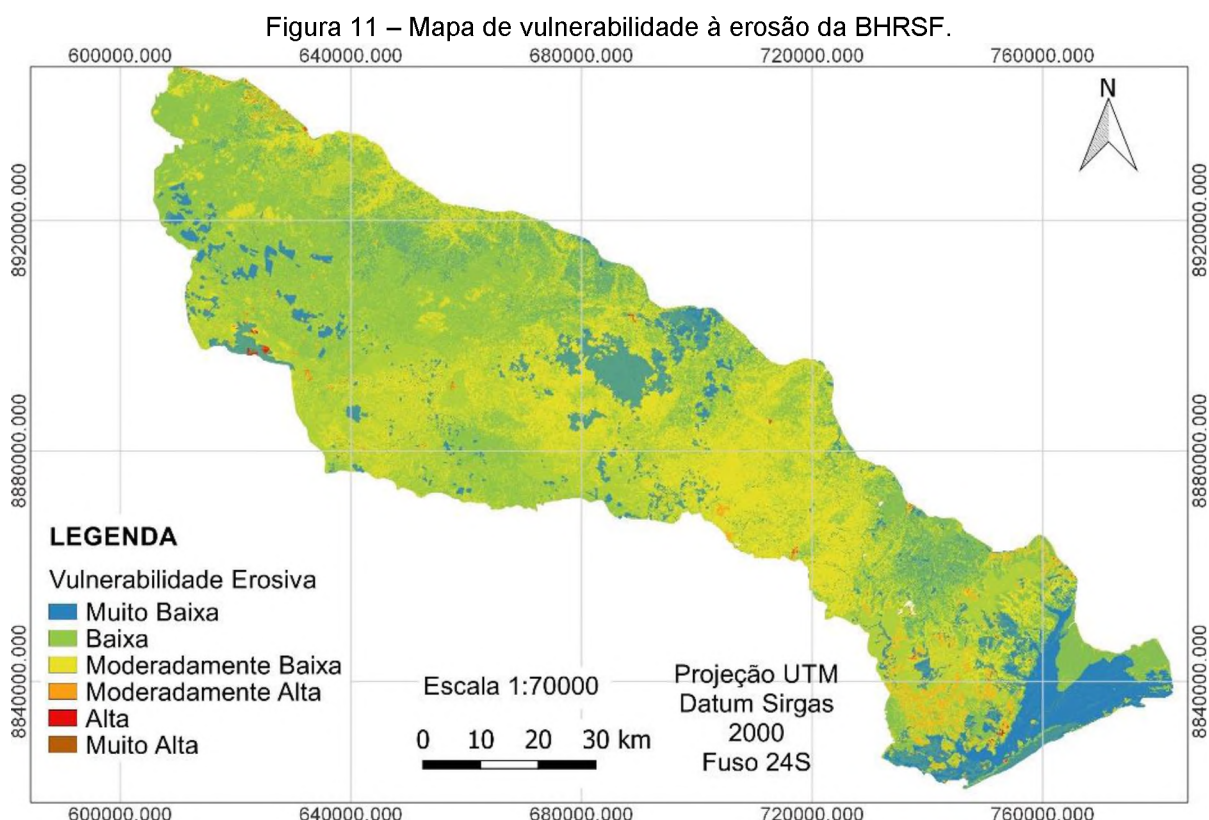
As classes moderadamente alta e alta somadas correspondem a 34% do total, aparecem na região central da bacia, sendo encontradas em áreas com declive e hipsometria elevadas, solos pedregosos e com consideráveis volumes de chuva,

potencializam os efeitos do escoamento superficial e, conseqüentemente, em altos índices de suscetibilidade a erosão. Esta situação foi comprovada no trabalho de Fontes (2016). Ao monitorar os usos de estacas no controle dos processos erosivos em taludes do baixo curso do rio São Francisco, observou-se maiores índices de erosão. Estes foram justificados pelo aumento do escoamento superficial decorrente dos meses de maior precipitação chuvosa e da textura arenosa dos solos dos taludes.

Assim, os resultados apresentados corroboram com as variáveis utilizadas e na definição da hierarquia adotada para analisar a suscetibilidade a erosão na BHRSF através das técnicas de geoprocessamento.

4.7 Vulnerabilidade aos processos erosivos

O mapa de vulnerabilidade a erosão foi resultado da integração do mapa de suscetibilidade erosiva com o de cobertura do solo, que pode ser visto na Figura 11.



Fonte: A autora.

A seguir consta a Tabela 9, que apresenta os valores proporcionais à cada classe do mapa de vulnerabilidade.

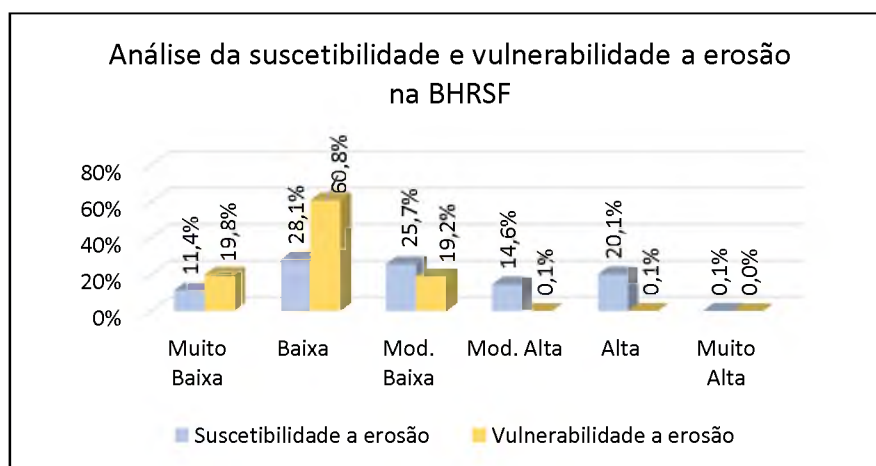
Tabela 9 – Vulnerabilidade à erosão por classe (em % e Km²).

Vulnerabilidade	Área (%)	Área (Km²)
Muito Baixa	19,8	1410,6
Baixa	60,8	4329,0
Moderadamente Baixa	19,2	1362,9
Moderadamente Alta	0,1	4,9
Alta	0,1	8,4
Muito Alta	0	0,3

Fonte: A autora.

Com os valores da área de cada classe obtidos do mapa de suscetibilidade e vulnerabilidade, foi construído um gráfico, apresentado na Figura 12, para fazer a análise comparativa entre a proporção de cada classe e auxiliar na compreensão do potencial erosivo da bacia BHRSF.

Figura 12 – Áreas por classe de suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão.



Fonte: A autora.

A partir da análise gráfica percebe-se que houve um aumento expressivo das áreas que apresentaram suscetibilidade erosiva moderadamente baixa, moderadamente alta e alta. No entanto, as áreas com vulnerabilidade erosiva muito baixa e baixa foram maiores do que as áreas suscetíveis à erosão. Isso ocorreu em função da predominância da pastagem.

Os sistemas de pastagens que levam em consideração a capacidade de suporte do solo e boas práticas de manejo, como o sistema de rotação de pastos, o controle da taxa de lotação de animais e de queimadas (WADT, 2003), são coberturas vegetais apropriadas ao controle da erosão. Ross (2011) também estabeleceu que as pastagens cultivadas sem a presença de rebanho, oferecem alta proteção para o solo frente aos processos erosivos. A predominância de áreas com baixa vulnerabilidade erosiva decorrente da maior cobertura dos solos por pastagens também foi

constatada, por Moura *et. al.* (2017), no estudo da estimativa da perda de solo para a mesma área de estudo, validando assim os resultados aqui obtidos.

Entretanto, apesar da área apresentar baixa vulnerabilidade erosiva em função das pastagens, é necessária a adoção de técnicas naturais conservacionistas que levem em consideração as limitações do local, visto que houve uma perda drástica de vegetação nativa, o que coloca em risco a estabilidade das variáveis ambientais. Dentre as técnicas que podem ser aplicadas para a conservação do solo e para a minimização da ação dos agentes erosivos podem ser citados: o terraceamento de encostas, a rotação de culturas, o recobrimento do solo com matéria orgânica morta e, principalmente, a recomposição da vegetação ciliar e o reflorestamento.

A rotação de culturas em áreas produtivas, a recomposição da vegetação ciliar e o reflorestamento são técnicas de proteção, minimização e recuperação de caráter vegetativo. É importante ressaltar que no processo de reflorestamento é necessário a preparação do solo em nível com sulcos e camalhões, visando minimizar a perda de solo e nutrientes por escoamento superficial, plantio por coveamento em nível com espaçamento previamente determinado e combinação de espécies de diferentes grupos ecológicos de pioneiras, secundárias e climáticas. Concomitantemente aplicam-se as técnicas edáficas, destacando a adubação orgânica com recobrimento do solo com serapilheira e calagem para correção da acidez do solo pela aplicação do cálcio, que aumenta o aproveitamento do fósforo pelas plantas e a fixação de nitrogênio pelos organismos. Por fim, o terraceamento das encostas completa a proteção da superfície, reduzindo a velocidade de escoamento, proporcionando a maior infiltração e o armazenamento das águas das chuvas, as quais podem ser reaproveitadas ou não para outras atividades.

5 CONCLUSÃO

A análise da suscetibilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco no estado de Sergipe se concretizou através de técnicas de geoprocessamento, com destaque à álgebra de mapas por análise hierarquizada dos fatores naturais (erodilidade, erosividade e topografia) e antrópicos (cobertura do solo). O uso de Sistema de Informação Geográfica mostrou-se como é um instrumento adequado em análises ambientais, possibilitando inferir como cada fator natural e antrópico interfere nos processos erosivos da área de estudo. É importante ressaltar que a plataforma unificada de dados temáticos proporcionada pelo Banco de Dados Georreferenciados permite o armazenamento, consultas, atualizações, dentre outras funções inerentes às geotecnologias.

Diante dos resultados obtidos, verificou-se que a BHRSF apresenta, predominantemente, baixo potencial a suscetibilidade erosiva, evidenciada através da análise integrada dos agentes naturais. Estes resultados são necessários para subsidiar ações de caráter preventivo, visto a importância socioeconômica e ambiental da bacia. Com relação à vulnerabilidade aos processos erosivos, pôde-se constatar a predominância de regiões com baixo potencial erosivo, em função das áreas de pastagens que se estendem por toda bacia. Por mais que este uso tenha se mostrado como um artifício conservacionista é fundamental adotar medidas de gestão e planejamento, pois devido a intensificação da prática, pode causar impactos que comprometem o equilíbrio ambiental a médio e longo prazo.

Com base nos resultados encontrados, na compreensão das características do ambiente alterado pelas ações antrópicas e na dinâmica da bacia, sugere-se a elaboração de um estudo que leve em consideração todas as características do local e a utilização de dados atualizados, principalmente no que tange as informações de cobertura do solo e precipitação média anual da bacia. Pois, entende-se que uma pequena mudança nas variáveis pode refletir no equilíbrio do ambiente e na disponibilidade dos recursos naturais.

Por fim, a análise das áreas suscetíveis e vulneráveis aos processos erosivos na BHRSF é uma contribuição para estudos futuros e uma ferramenta de auxílio na tomada de ações necessárias, pelos órgãos competentes, à minimização dos impactos ambientais. Dessa forma, sugere-se a implantação de técnicas que estabilizem os solos das vertentes e de recuperação da vegetação como preconiza a

Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Nesse sentido, tem-se o disciplinamento das águas superficiais e subsuperficiais e a contenção das encostas, medidas consagradas na literatura científica para evitar, minimizar, recuperar, gerenciar e monitorar os processos erosivos em áreas urbanas e/ou rurais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J. **Erosividade das chuvas na bacia hidrográfica do rio Apeú, região nordeste do estado do Pará**. 2013. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, São Paulo, 2013.
- ALMEIDA FILHO, G. S. Em Foco: Controle de Erosão. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**. São Paulo, ano 5, n. 54, p. 72-83. mar. 2015.
- BARROS, E. N. S., VIOLA, M. R., RODRIGUES, M., ASSAID, J., DE MELLO, C. R., AVANZI, J. C., & GIONGO, M. Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, 2018.
- BERNARDI, E. C. S.; PANZIERA, A. G.; SWAROWSKY, A.; BURIOL, G. A. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas. **Disciplinarum Scientia**. Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 159-168, 2012.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7.ed. São Paulo: Ícone, 2010.
- BRADY, N. C. Erosão do solo e seu controle. **Natureza e propriedades dos solos**. Tradução: Antônio B. Neiva Figueiredo Filho. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Proteção da vegetação nativa. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 11/08/19.
- CÂMARA, G. Modelos, Linguagens e Arquiteruras para Bancos de Dados Geográficos. Tese de Doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1995.
- CARVALHO, M. E. S.; FONTES A. L. Estudo Ambiental da Zona Costeira Sergipana Como Subsídio ao Ordenamento Territorial. **GEONORDESTE**, Ano XV, N° 2, 2006.
- COELHO, A. L. N. Sistema de Informações Geográficas (SIG) como suporte na elaboração de planos diretores municipais. **Caminhos de Geografia (UFU)**, Espírito Santo, v. 10, p. 93-110, 2009.
- CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “Fallout” do ¹³⁷Cs**. 2019. 99 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64132/tde-13042004-111210/publico/Vladia.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2019.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 103p. 2001.
- CUIABANO, M. N.; NEVES, S. M. A. S.; NUNES, M. C. M.; SERAFIM, M. E.; NEVES, R. J. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica na sub-bacia do córrego do Guanabara/Reserva do Cabaçal-MT Brasil. **Geociências**. Mato Grosso, v. 36, n. 1, p. 138-153, 2017.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- FAO (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy 60 p.
- FITZ, Paulo Roberto, **Geoprocessamento sem complicação**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FONTES, C. D. S. **Dinâmica dos processos erosivos em taludes do baixo curso do Rio São Francisco: desafios para seu controle com uso de geotêxteis**. 2016. 184 f. Tese (Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT. 1981.

JACOMINE, P. K. T.; MONTENEGRO, J. O.; RIBEIRO, M. R.; FORMIGA, R. A. **Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Estado de Sergipe**. Recife: EMBRAPA-CPP, 1975. 506p.

JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. **The study on water resources development in the state of Sergipe in the Federative Republic of Brazil**. JICA, 2000, 406p.

GDOURA, K.; ANANE, M.; JELLALI, S. Geospatial and multi-criteria analysis to rank suitable sites of shallow aquifer recharge with reclaimed water: Application to Nabeul - Hammamet groundwater. Laboratório de Tratamento de Águas Residuais, Centro de Pesquisa e Tecnologia de Água. Borj Cédria. 2014.

GOBBI, E.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; WERNER, R. S.; RAMOS, R. R.; PAZ-FERREIRO, J.; GLEBER, L. Erosão hídrica associada a algumas variáveis hidrológicas em pomar de maçã submetido a diferentes manejos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 35, n. 3, p. 1013-1024, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000300035&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 30 jul. 2019.

GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2000. 372p.

GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 1998. 472p.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Mato Grosso do Sul, v. 23, n. 1, p. 145-154, 1999.

HOLANDA, F. S. R.; BANDEIRA, A. A.; ROCHA, I.P.; ARAÚJO FILHO, R. N.; RIBEIRO, L. F.; ENNES, M. A. Controle da erosão em margens de cursos d'água: das soluções empíricas à técnica da bioengenharia de solos. **Raega**, n. 17, p. 93-101, 2009.

INPE. TOPODATA. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 23 mai. 2019.

MAGALHÃES, R. A. Erosão: definições, tipos e formas de controle. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7, 2001, Goiânia/GO. Goiânia: Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, 2001. 11p.

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. A.; SANTOS JUNIOR, R. C.; SOUZA, W. F. L. Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL). **Geochimica Brasiliensis**, v.21, n. 2, p. 212-231, 2007.

MOURA, Marks Melo et al. Estimativa de perda de solo no Baixo São Francisco Sergipano. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 126-135, 2017.

NASCIMENTO, P. S. R. Subsídio à gestão ambiental hidroviária: o empreendimento hídrico Santa Maria da Serra. 2004. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

PEREIRA, E. A.; SOUSA, A. P.; CAMPOS, S. Mapeamento do uso do solo nas sub-bacias dos córregos São José e Água do Ventura. **Revista Irriga**, Bauru -SP, v.7, n.3 p. 191-200, 2002.

PEREIRA, S. B. et al. Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v.7, n.3, p.423-429, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br>. Acesso em: 10 de julho de 2019.

PIMENTA, L. B., BELTRÃO, N. E. S., DA SILVA GEMAUQUE, A. M., & TAVARES, P. A. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações** (Campo Grande), v. 20, n. 2, p. 407-420, 2019.

PINESE JÚNIOR, J.F. **Aplicação do método de análise hierárquica – AHP – para a determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade/MG**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2010.

ROCHA, Igor Pinheiro da. **Relação entre a erosão marginal, atributos físicos do solo e variáveis hidrológicas e climáticas no baixo São Francisco sergipano**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2009.

REZENDE, P.S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. Construção de modelo e utilização do método de Processo Analítico Hierárquico– AHP para mapeamento de risco à inundação em área urbana. **Revista Caminhos da Geografia**, Uberlândia, Minas Gerais, v. 18, n. 61, p. 01–18, mar. 2017.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, p.63-74, 1994.

ROSS, J. L. S. (Org.). **Geografia do Brasil**. 6ª ed. São Paulo: Editora da USP, 2011.

SAATY, T. L. How to make a Decision: The Analytic Hierachy Process. **Interfaces**, North-Holland, Pittsburgh, v.24, n.6, p.19-43, nov. 1994.

SALOMÃO, F. X. de T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229-265.

SANTOS, A.R.; LOUZADA, F.L.R.O.; EUGENIO, F.C. **ARCGIS 9.3 total: aplicações para dados espaciais**. Alegre, Espírito Santo: CAUFES, 2010.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; DE OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Paraíba, v. 14, n. 2., p. 115-123, 2010.

SANTOS, L. A. N. **Geoprocessamento aplicado na análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Japaratuba – SE**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, 2019.

SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. R. Compartimentação da Bacia Hidrográfica do Rio Japaratuba (SE) através da densidade de drenagem fluvial. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 5, 2018, Juazeiro. **Anais** [...] Juazeiro: Universidade Federal de Sergipe, 2018, p. 1336- 1341.

SANTOS, L. F. M. **SIG e álgebra de mapas na elaboração de um mapa de potencial de erosão em áreas de silvicultura**. 2011. 75 f. Trabalho (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SANTOS, R. A.; MARTINS A. A. M.; NEVES J. P.; LEAL, R. A. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**: Geologia e recursos minerais do Estado de Sergipe. Texto explicativo do Mapa geológico do Estado de Sergipe, Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT/CODISE. 1998, 156 p.

SÃO MIGUEL, A. E; MEDEIROS, R. B.; GOMES, W. M. Emprego do Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão São Pedro, Santa Rita do Pardo/MS. **Cerrados**, v. 16, n. 2, p. 31-50, 2018.

SEMARH. Secretária de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe. Aracaju, 2014

SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.; CARVALHO, L.M.T. **Zoneamento Ecológico Econômico do Estado de Minas Gerais – Componentes Geofísicos e Bióticos**. Lavras: Editora UFLA, 2008.

SILVA, C. A. da; NUNES, F. P. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. *In*: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. INPE, 2009. p. 5435-5442.

SILVA, R. M.; BELDERRAIN, M. C. N. Considerações sobre métodos de decisão multicritério. *In*: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, 11., 2005. Anais [...]. São José dos Campos: XI Encita, 2005. p. 1-7. Disponível em: <http://www.bibl.ita.br/xiencita/Artigos/Mec03.pdf> 2005.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen**. Ano 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2010. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/834/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 jul. 2019.

TOLEDO, J. S.; DE MARIA, I. C.; DECHEN, S. C. F. Impacto de chuvas intensas na erosão hídrica em solo com tratamento de lodo de esgoto. *In*: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6, 2012, Jaguaraiúna/SP. Universidade Católica de Campinas, 2012, 10 p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE/SUPREN, 1977.

WADT, P.G.S. et al. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Embrapa AcreDocumentos, 90. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2003.

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. **Erosão e Assoreamento**. *In*: Vulnerabilidade Ambiental Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos. Brasília: MMA, 2007.

WISCHMEIER, WH; SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.